2021年春季塔里木盆地典型沙尘天气过程气溶胶垂直分布及传输

田文君[1,2]， 薛一波[1,2]， 张小啸[1]， 雷加强[1]， 李生宇[1]，
范敬龙[1,3]， 张 恒[1,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 塔克拉玛干沙漠生态系统新疆野外科学观测研究站，新疆 且末 841900）

摘 要：利用2021年4月下旬塔克拉玛干沙漠腹地激光雷达观测资料，结合ERA5再分析资料、HYSPLIT模式和环境监测及气象观测站的数据，分析沙尘气溶胶光学信息的垂直分布特征，对塔里木盆地大范围沙尘天气的产生原因、发展过程、潜在来源和传输路径进行探讨。结果表明：沙漠腹地在4月19日20:00—21日14:00和22日14:00—26日18:00出现了两次强沙尘天气过程，沙尘集中分布在0~5 km高度，0~2 km消光系数>0.3 km^{-1}；退偏比>0.6，远高于沙尘气溶胶的判定阈值0.31；两次沙尘天气过程均受高空低槽和地面冷空气共同影响，第一次沙尘天气过程主要由翻越天山的冷空气导致，喀什、和田和阿克苏均出现扬沙天气，和田PM_{10}浓度于22日达到峰值3763 $\mu g \cdot m^{-3}$，沙尘来自盆地西部；第二次沙尘天气主要来源于盆地东北处的冷空气入侵，库尔勒和阿克苏的PM_{10}浓度于25-26日突增至1200 $\mu g \cdot m^{-3}$以上，沙尘源区位于沙漠腹地、盆地东北部及北部；第二次沙尘天气过程的污染传输高度更高、持续时间更长且影响范围更广。沙漠腹地塔中尘源丰富，沙尘天气期间沙尘气溶胶垂直分布超过4 km，沙尘传输高度显著大于沙尘天气高发区和田和民丰。

关键词：塔里木盆地；沙尘天气；气溶胶；垂直分布；激光雷达；塔中；PM_{10}

沙尘天气是土壤表面的沙粒、尘埃等颗粒物在风力的作用下脱离地表而导致大气能见度下降的天气现象，多发生于植被覆盖率较低的干旱和半干旱地区，是一种严重影响自然环境和人类生产生活的灾害性天气。沙尘颗粒物作为对流层气溶胶的主要成分之一，约占大气气溶胶总质量的35%[1]。全球地表年沙尘排放量超过1700 Tg[2]，这些悬浮的沙尘粒子不仅能通过自身辐射效应改变地-气系统的辐射平衡，还能作为云凝结核或大气冰核间接影响天气和气候[3]，同时也会为海洋和雨林生态系统输送铁、磷等矿质元素[4]。此外，沙尘气溶胶还会和SO_2、NO_2等大气污染物发生化学反应形成更严重的二次污染[5]。因此，风沙灾害是当前全球变化和生态环境领域关注的热点问题。

针对干旱区沙尘天气和土壤风蚀的科学研究始于上世纪30年代，Bagnold[6]和Gillette[7]等分别提出了土壤沙尘排放的物理机制和经验模型，随后的研究又逐步完善了DPM（Dust Production Model）[8]、Shao04[9]、Kok[10]模型等沿用至今的物理模型，这为风沙研究奠定了丰富的理论基础。位于中亚内陆干旱区、沙漠面积广阔的塔里木盆地是东亚风沙灾害研究的重点区域之一，我国自上世纪60年代开始对塔里木盆地进行野外观测，由于自然环境恶劣，系统而全面的观测工作直至90年代才逐步在盆地内推进。至今，国内外学者已通过地面观测、卫星监测和数值模式模拟等手段针对塔里木盆地沙尘活动开展了大量科研工作。塔里木盆地以流动沙丘为主，细砂和极细砂占比超过70%[11]，在冷空气入侵和盆地大地形等因素的影响下[12]，盆地内形成了多发于春夏季的浮尘、扬沙和沙尘暴天气，且沙尘天气高发区集中于盆地南缘和沙漠腹地[13]。作为我国浮尘天气的高频发生中心，塔里木盆地浮尘

收稿日期：2024-10-14； **修订日期**：2024-11-26
基金项目："天山英才"培养计划（2022TSYCCX0012）；国家自然科学基金项目（42177088）；中国科学院西部青年学者项目（2020-XBQNXZ-015）
作者简介：田文君（1998-），女，硕士研究生，主要从事干旱区大气环境研究. E-mail: tianwenjun23@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：张小啸. E-mail: zhangxx@ms.xjb.ac.cn

年平均日数多达77 d[14],且自2012年起年均日数呈上升趋势[15],这些滞空沙尘集中于5 km以下,最大抬升高度超过9 km,受周围高山阻挡,仅约四分之一的沙尘能随西风环流远距离传输至我国华北地区[16],甚至跨越太平洋到达北美和欧洲[17]。剩下大部分沙尘直接沉降于盆地内部,尤其是盆地中部及南部,沙漠腹地塔中的年均降尘量远高于盆地周边其他站点[18]。总体来看,塔里木盆地上空沙尘的辐射强迫会使地气系统变冷[19],但少部分由盆地输送至青藏高原的沙尘可通过吸收太阳辐射加热大气而导致地表升温,从而加速高原积雪融化[20]。沙尘垂直分布对探究沙尘天气持续时间、远距离传输及辐射强迫至关重要,随着遥感技术的发展,有着良好时间分辨率和垂直分辨率的地基激光雷达逐渐广泛应用于塔里木盆地沙尘气溶胶的探测和研究中,其很好地弥补了静止气象卫星无法获取垂直分布信息、极轨气象卫星(如CALIPSO)难以实现定点观测的缺陷[21]。退偏比、消光系数等雷达参数可以反映某一固定地点一定高度内沙尘污染分布的变化情况[22],同时结合其他观测资料可进一步提高沙尘循环过程、微物理特性和气候效应研究的准确性。

塔里木盆地作为我国"一带一路"的核心区域之一,风沙环境问题对当地社会经济的可持续发展和生态环境影响显著。但由于恶劣自然环境限制,盆地地面观测站主要集中于沙漠边缘的绿洲区;同时,针对盆地沙尘气溶胶垂直分布变化特征的研究还较为薄弱,亟待深入分析。本研究深入塔克拉玛干沙漠腹地塔中,基于激光雷达数据探究了该地2021年4月下旬两次沙尘天气过程中气溶胶粒子的垂直分布和光学特性变化,并结合ERA5再分析资料、HYSPLIT模式和周边环境监测站及气象观测站的多源数据,分析了沙尘气溶胶光学信息的垂直分布特征,并对盆地大范围沙尘天气的发展过程、产生原因、污染程度、潜在来源和传输路径进行探讨,以期为西北干旱区风沙灾害的预警和防治提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木盆地深居亚欧大陆腹地,位于我国新疆南部,常住人口超过1000×10⁴人,主要集中分布于盆地边缘的绿洲城市。盆地地形呈环状分布,北、西、南三面紧邻天山、帕米尔高原和昆仑山,地势西高东低。常年盛行东北风和西北风,南部青藏高原阻挡了来自北印度洋的暖湿气流,形成大陆性极端干旱气候。日照强烈,昼夜温差大,年均蒸发量超过2000 mm,而大部分地区降水量常年不足50 mm。塔里木盆地植被极端稀少,地表多为裸露的流动风沙土,拥有世界第二大流动沙漠塔克拉玛干沙漠,沙尘活动频繁而剧烈,总体呈现出南多北少的纬向分布特征,年均沙尘天气日数多达89 d[14],是开展风沙研究的天然试验场。

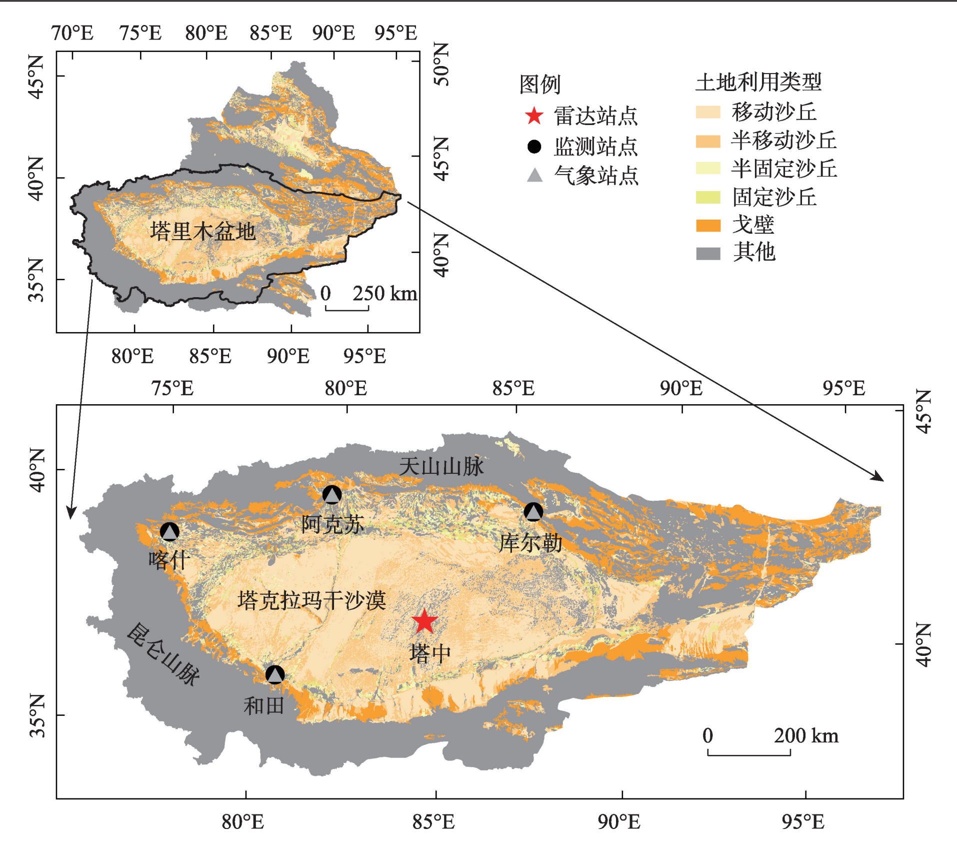
本研究采用的环境监测站分别位于喀什(39.47°N,75.98°E)、和田(37.13°N,79.93°E)、阿克苏(41.17°N,80.23°E)和库尔勒(41.75°N,86.13°E),激光雷达放置于新疆巴音郭楞蒙古自治州且末县的塔中植物园(38.97°N,83.66°E),海拔1099.3 m,站点附近地形平坦、无高大障碍物遮挡,探测效果较好。塔里木盆地各观测站点分布如图1所示。

1.2 数据来源

喀什、和田、阿克苏和库尔勒4个站点的PM_{10}浓度和沙尘天气数据分别来源于中国环境监测总站(http://www.cnemc.cn)和中国气象数据网(https://data.cma.cn)。根据GB/T 20480—2017《沙尘天气等级》[23]将水平能见度<10 km时划分为浮尘,水平能见度1~10 km为扬沙,水平能见度500~1000 m为沙尘暴,水平能见度<500 m为强沙尘暴(研究时段内塔里木盆地未出现强沙尘暴天气)。塔中激光雷达观测数据来自无锡中科光电公司生产的便携式大气颗粒物监测激光雷达(AGHJ-I-LIDAR型,MPL),观测时间为2021年4月16日0:27至4月30日23:25。同时利用中国气象数据网(https://data.cma.cn)的塔中天空状况数据来判断雷达高空探测是否受到云的影响。

不同高度的气压、温度、风速风向和位势高度等气压场数据来自于ERA5(欧洲中尺度天气预报中心第五代大气再分析数据集),该数据集是在大量历史观测数据基础上利用先进数值建模方案和数据同化系统得到大气状态参数的逐小时数据,空间分辨率为0.25°×0.25°[24]。本研究利用500 hPa和850 hPa等压面的风场和温度场分析环流背景对地面沙尘释放的影响。

盆地气团的移动路径由HYSPLIT后向轨迹模



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2020)4619号，对底图边界无修改。下同。

图1 雷达观测、环境监测及气象观测站点分布

Fig. 1 Distribution of ground-based lidar, environmental monitoring and meteorological observation stations

式模拟。HYSPLIT模式由美国国家海洋大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局(ABOM)联合研发，用于计算和模拟气团的扩散、传输、转化和沉降过程，是拉格朗日方法和欧拉方法相结合的混合模型[25]。采用美国国家环境预报中心(NCEP)的GDAS1气象资料，水平分辨率为1°×1°，选取塔中(38.97°N，83.66°E)为目标站点，设置气团高度为距地面500 m、1000 m和2000 m，使用HYSPLIT模式(https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajasrc.pl)模拟了两次沙尘天气期间的24 h后向轨迹，进一步探究塔中沙尘的来源和传输路径。

1.3 研究方法

激光雷达采用米散射原理，通过探测激光与大气相互作用的辐射信号来遥感大气。它由光学接收系统、光学采集系统、数据采集控制系统三部分组成，反演产品包括气溶胶退偏比、消光系数和大气边界层高度等。MPL发射和接收波长为532 nm的激光，时间分辨率和空间分辨率分别为3 s和3.75 m(及其倍数)，最大探测距离大于15 km，通过调节收发器的仰角可对天空不同角度进行扫描观测，具体参数如表1所示。在本研究中，激光雷达扫描的时间间隔为5 s，探测高度约为22.5 km。

MPL发射的激光脉冲在大气中与气溶胶粒子不断相互作用，从散射或反射回雷达接收端的脉冲信息中即可获取气溶胶粒子的垂直分布情况。激光雷达接收的后向散射回波信号可用雷达方程表示为：

表1 MPL技术参数

Tab. 1 Technical parameters of MPL

技术指标	性能参数
激光器	激光二极管泵浦固体调Q激光器
波长	532 nm
空间分辨率	3.75 m及倍数(可调)
时间分辨率	优于3 s
最大探测距离	≥15 km
脉冲能量	≥10 μJ(可调)
脉冲重复频率	2~7 kHz
接收场视角	≤1.0 mrad
重量	≤30 kg

$$P(r)=\frac{P_0k}{r^2}\left[\beta_m(r)+\beta_a(r)\right]\exp\left\{-2\int_0^r\left[\alpha_m(r')+\alpha_a(r')\mathrm{d}r'\right]\right\}$$

式中：P_0 为激光雷达的发射功率(W)；r 为激光雷达到探测目标的距离(m)；β_m 和 β_a 分别为空气分子和气溶胶的后向散射系数($km^{-1}\cdot sr^{-1}$)；α_m 和 α_a 分别表示空气分子和气溶胶的消光系数(km^{-1})。

本研究采用了MPL反演的消光系数和退偏比。气溶胶消光系数 α_a 由Fernald[26]方法反演，消光系数 α_a 越大，气溶胶浓度越高。不同形状的气溶胶粒子与激光作用后会产生不同的偏振度，定义退偏比 δ 为垂直入射光后向散射信号 $P_\perp$ 和平行入射光后向散射信号 $P_\parallel$ 的比值，退偏比 δ 越大，气溶胶的非球形特征越显著，沙尘含量越高。

2　结果与分析

2.1　激光雷达观测

激光雷达能获取气溶胶的垂直分布信息，由于塔里木盆地气溶胶以沙尘为主，沙尘气溶胶含量显著高于大陆气溶胶、污染性大陆气溶胶和烟尘等其他气溶胶组分[27]，因此激光雷达在盆地内观测的气溶胶退偏比和消光系数可用于判定沙尘含量和污染物浓度。当退偏比>0.31时，污染物为沙尘气溶胶；当消光系数>0.085 km^{-1}时，存在沙尘或人为污染[28]。图2为激光雷达反演的塔中2021年4月16日—5月1日消光系数和退偏比。总体而言，塔中出现了两次明显的沙尘天气过程，分别为4月19日20:00—21日14:00和4月22日14:00—26日18:00。消光系数和退偏比在时间和高度上均呈现出较好的一致性，说明塔中在该时段内以非球形的沙尘颗粒污染为主，且沙尘集中分布在0~5 km范围内。高空5~15 km存在消光系数和退偏比高值区，由气象观测数据可知，当地4月21日、24日和26日为多云天气，17—19日及4月22日为阴天。在这两种天气条件下，高空低温导致云粒子凝结为形状不规则的冰晶，这些粒子和沙尘气溶胶同样具有较大的退偏比，因此可推断该区域可能为云或混合沙尘云。

4月19日20:00起，近地面沙尘开始积累，消光系数由小于0.2 km^{-1}突增至1.3 km^{-1}，退偏比由6 h前的0.75增长至0.99，说明沙尘污染过程中沙粒的含量较高。20日4:00—6:00，沙尘向上扩散传输至8 km高度，近地面消光系数接近1.7 km^{-1}，沙尘污染加重。21日14:00，消光系数减弱至0.3 km^{-1}，第一次沙尘天气逐渐结束。第二次沙尘天气始于22日14:00，近地面消光系数再次增大，且在随后两天内达到整个4月下旬的最大值1.9 km^{-1}。25日塔中为晴天，雷达观测受云影响较小，高空7~12 km出现沙尘带，且高空污染逐渐下沉与地面沙尘混合并积累，近地面污染加重。26日18:00后，消光系数和退偏比显著降低，沙尘开始消散。29日上午天气晴好，高空8~12 km消光系数大于0.4 km^{-1}，存在沙尘污染，但近

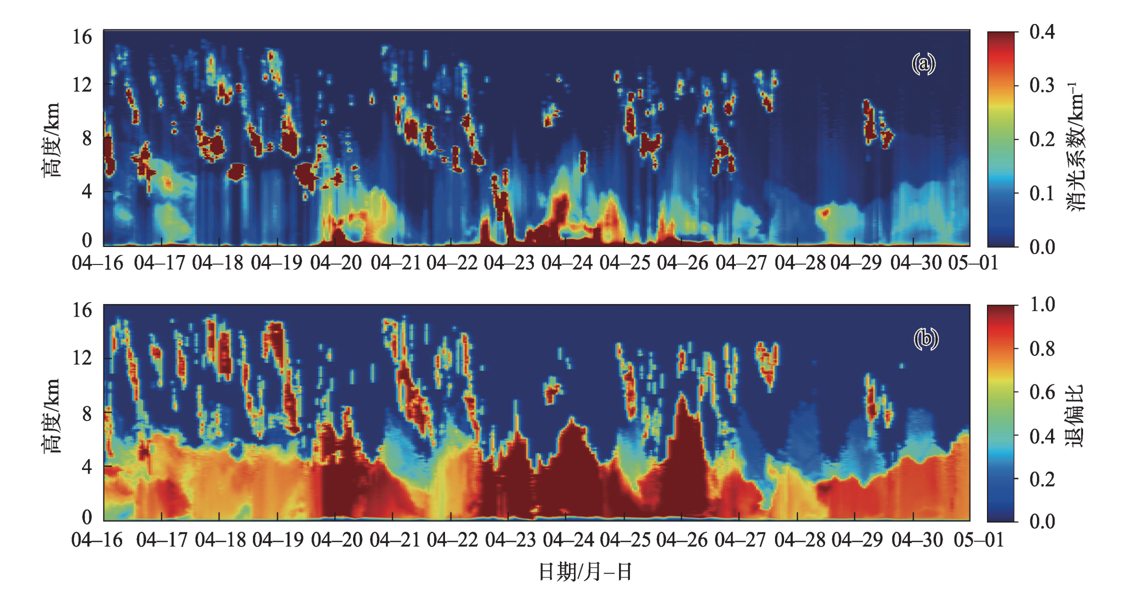


图2　2021年4月16日—5月1日气溶胶消光系数(a)和退偏比(b)垂直分布

Fig. 2　Vertical distribution of extinction coefficient (a) and depolarization ratio (b) of dust aerosols from April 16 to May 1, 2021

地面消光系数和退偏比较小，说明高空沙尘极可能由外来输送和地面扩散共同导致。

分别对两次典型沙尘天气过程进行讨论，考虑沙尘分布高度和高空云的影响，将第一次和第二次沙尘天气的分析高度设置为0~5 km和0~12 km，图3和图4为两次沙尘污染前、污染中、污染积累和污染消散(从左至右)对应四个典型时刻的消光系数和退偏比廓线。第一次沙尘过程污染前，高空3~5 km的消光系数大于0~3 km，而退偏比相对较小，说明此时近地面沙尘浓度低且高空探测受云影响较大。沙尘污染开始后，近地面消光系数迅速增大，整个高度内退偏比趋近于1.0。随着沙尘不断积累，消光系数和退偏比再次升高，直到4月21日污染消散后，消光系数和退偏比才逐渐接近污染前的水平。在第二次沙尘天气过程中，消光系数和退偏比同样符合先增大后减小的趋势，但在污染积累阶

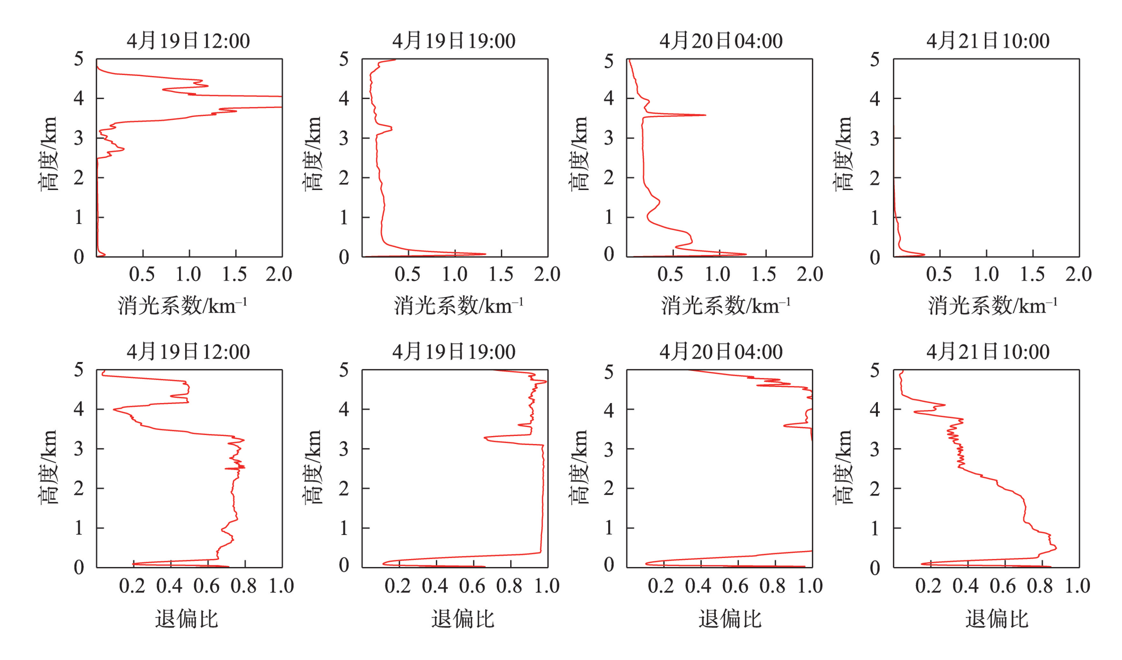


图3 第一次沙尘天气过程4个典型时刻消光系数和退偏比廓线

Fig. 3 Profile of extinction coefficient and depolarization ratio at four typical moments of the first dust weather process

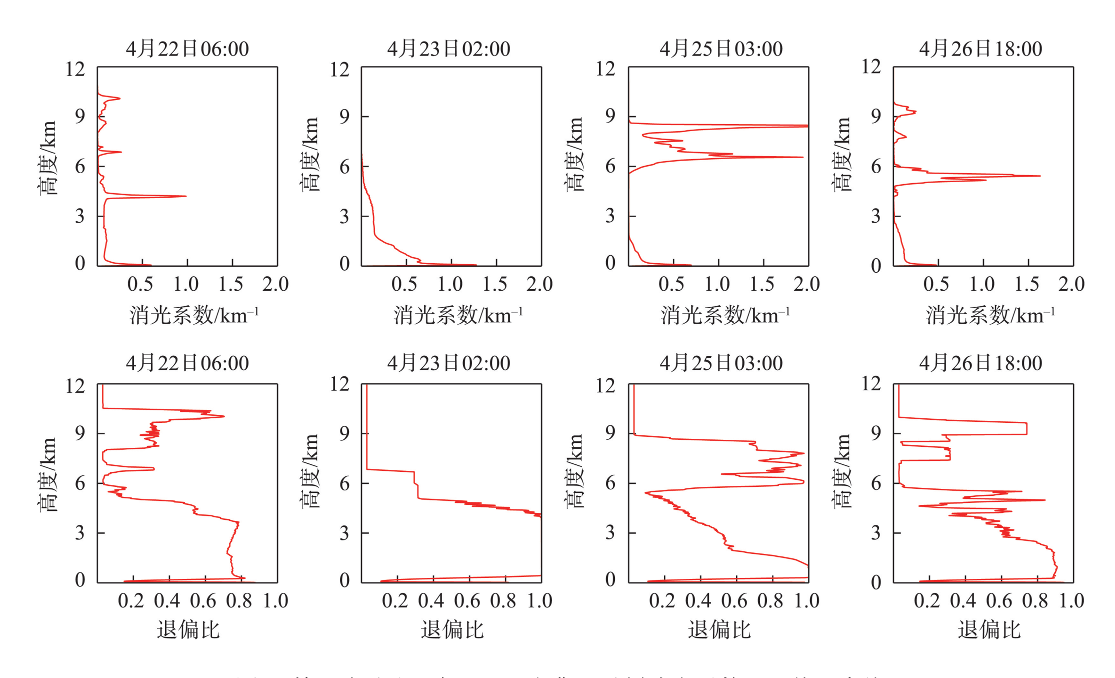


图4 第二次沙尘天气过程4个典型时刻消光系数和退偏比廓线

Fig. 4 Profile of extinction coefficient and depolarization ratio at four typical moments of the second dust weather process

段,低空沙尘含量相对降低,而高空出现了明显的沙尘带,即3~6 km的沙尘含量明显低于上下两层大气,说明25日03:00高空沙尘污染在受到地面沙尘扩散影响的同时主要由外地输送导致。26日18:00,近地面沙尘浓度降低,高空5~6 km高空仍存在一定量沙尘。以消光系数0.31作为沙尘气溶胶判定阈值,雷达观测期间沙漠腹地塔中多时段沙尘气溶胶分布超过4 km,传输高度显著大于盆地浮尘天气最高值中心和田(187 d)和沙尘暴最高值中心民丰(31 d)[14,22,29]。

在沙尘污染期间,塔中0~2 km内的消光系数普遍>0.3,这与前人塔里木盆地沙尘天气激光雷达观测的研究结果具有较好的一致性[30]。在整个观测时段内,即使不在沙尘天气期间,0~2 km内的气溶胶退偏比基本大于0.6,远高于沙尘气溶胶的判定阈值0.31[28],也高于塔里木盆地其他站点观测得到的退偏比[22,29,31]。这是由于塔中位于沙漠腹地,地表被大量沙尘覆盖且沙粒松散、起沙风速较小,沙尘易被扬起,同时4月又是塔里木盆地沙尘天气高发期,因此在本研究观测时段内塔中近地面大气中沙尘含量较高。

2.2 沙尘天气过程环流背景

塔里木盆地位于北半球中纬度地区,主要受西风环流和蒙古—西伯利亚高压影响。图5为第一次沙尘天气过程500 hPa高度场、温度场和风场,表现为明显的"两槽一脊"型,4月19日08:00、19日20:00、20日05:00和21日14:00分别对应第一次沙尘污染前、污染开始、污染积累和污染结束4个阶段。19日08:00,冷空气由新地岛不断南下,在西西伯利亚不断堆积并加深发展,形成西西伯利亚东部—乌拉尔山横槽,低压中心和冷中心均位于西西伯利亚东部,贝加尔湖—蒙古存在一个高压脊,塔里木盆地位于槽前脊后,温度槽落后于高度槽,有利于高度槽的发展。在随后的两天内,新疆北部的低压系统逐渐向南移动,横槽转为西南槽且槽底逐渐接近北疆地区,为新疆带来大量冷空气,同时也使贝加尔湖—蒙古的高压脊不断东移并向北延伸,于21日14:00移至我国东北地区。19日08:00塔里木盆地存在一个弱高压脊,高压中心约5700 gpm,盆地内较高的气温为沙尘天气提供了热力条件,21日沙尘天气结束后,盆地内以稳定的西风气流为主。根据第一次沙尘天气过程850 hPa风场(图6)可知,在西伯利亚低压影响下,携带大量冷空气的偏西风翻越天山和帕米尔高原进入塔里木盆地,与盆地内干燥暖空气汇合形成冷锋;由于三面环山,另一支进入北疆的

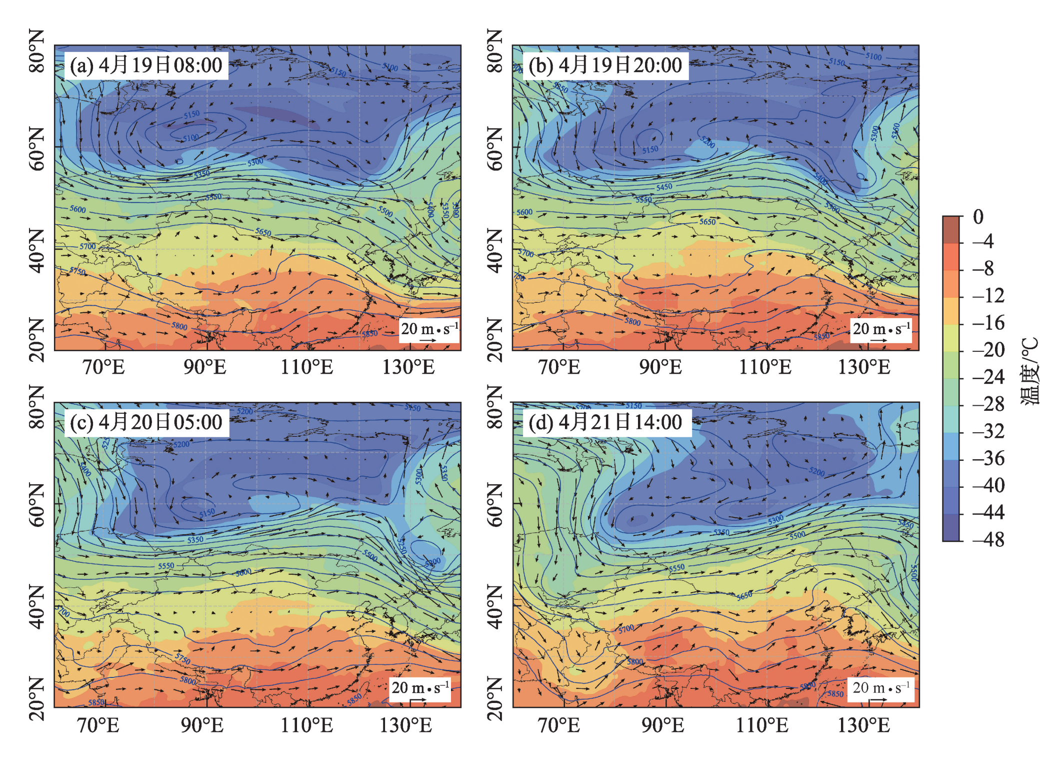


图5　第一次沙尘天气过程500 hPa高度场(等值线)、温度场(底色)和风场

Fig. 5　The 500 hPa height field (isoline), temperature field (background color) and wind field of the first dust weather process

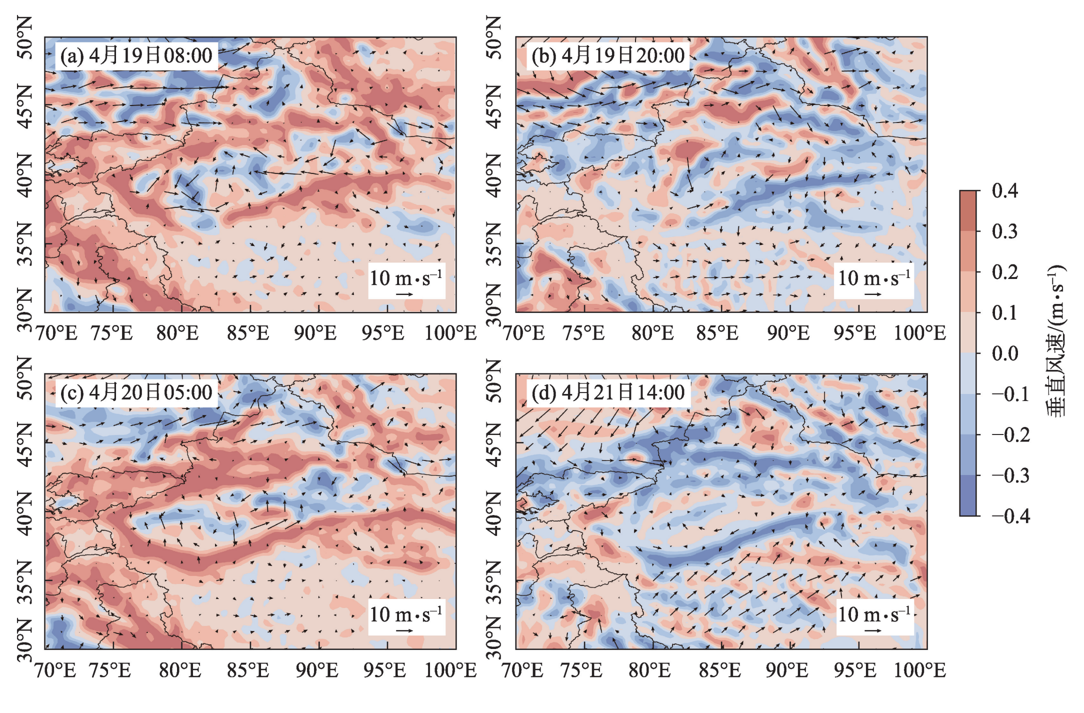


图6 第一次沙尘天气过程850 hPa风场

Fig. 6 The 850 hPa wind field of the first dust weather process

偏西气流在盆地东部的开口处转为东北气流进入盆地，或从盆地东北部的达坂城和百里风区两大风口入侵盆地。两支气流共同影响使盆地低空多处风速大于10 m·s^{-1}，多地出现沙尘天气，塔中850 hPa等压面高度在19日20:00与20日05:00为上升运动，有利于地面沙尘扬起。21日14:00，新疆北部由偏西风转为偏北风。天山阻挡作用使盆地低空风速显著减小，塔中、和田、库尔勒的沙尘天气结束。

图7为第二次沙尘天气过程4个典型时刻500 hPa环流形势，21日17:00，低压中心和冷中心位于新疆正北方约55°N处，存在一个延伸至伊朗的西南槽，高压脊位于云南—蒙古，塔里木盆地处于槽后脊前。22日14:00，低压中心和冷涡向南延伸，低压槽到达北疆地区，高压脊向北加深发展，盆地500 hPa高空盛行西南风。随后几天，低压中心东移经过新疆地区，盆地高空风速显著增大，多地出现浮尘、扬沙、沙尘暴天气。27日16:00，低压槽抵达内蒙古北部，而北疆—中西伯利亚西部发展出深厚高压脊，盆地上空受暖平流影响，风速迅速下降。由850 hPa风场（图8）可知，造成多地沙尘天气的冷空气同样来源于跨越盆地西侧山脉的偏西风和从盆地东侧开口处进入的东北风，22日14:00，850 hPa多处风速超过10 m·s^{-1}，且大部分地区受上升气流影响，大风和上升气流促使地面大量沙尘扬起，塔中0~2 km气溶胶消光系数大于0.4。当日，和田、库尔勒和阿克苏均出现扬沙天气，喀什发生强沙尘暴，和田PM_{10}浓度于凌晨03:00达到3763 μg·m^{-3}，库尔勒PM_{10}值也达到近期峰值。22—27日，位于北疆的槽逐渐东移，盆地低空风速减弱，27日16:00塔中近地面沙尘天气结束后，盆地仍以上升气流为主，不利于沙尘颗粒物沉降，因此库尔勒、阿克苏和喀什直到28日仍存在浮尘天气。

2.3 沙尘污染传输过程

2.3.1 *后向轨迹分析* 为探究沙漠腹地4月下旬两次沙尘天气的污染来源和传输过程，采用HYSPLIT模型对塔中四个典型时刻不同高度气团24 h的后向轨迹进行模拟，即第一次沙尘污染期间（20日06:00）和污染结束（21日22:00）及第二次沙尘污染期间（24日04:00）和污染结束（27日06:00），如图9和图10所示。由于沙尘主要集中在近地面，将气团轨迹高度设置为500 m、1 km和2 km。如图9a，后向轨迹统计结果表明造成第一次沙尘天气过程的沙尘源主要位于塔中西部，500 m和1000 m高度气团自盆地西北部出发，裹挟着地面沙尘在向塔中移动过程中逐渐扩散升空，2 km气团自西南方向缓慢下沉至塔中。由图9b可知，1 km和2 km的气团来源于盆地

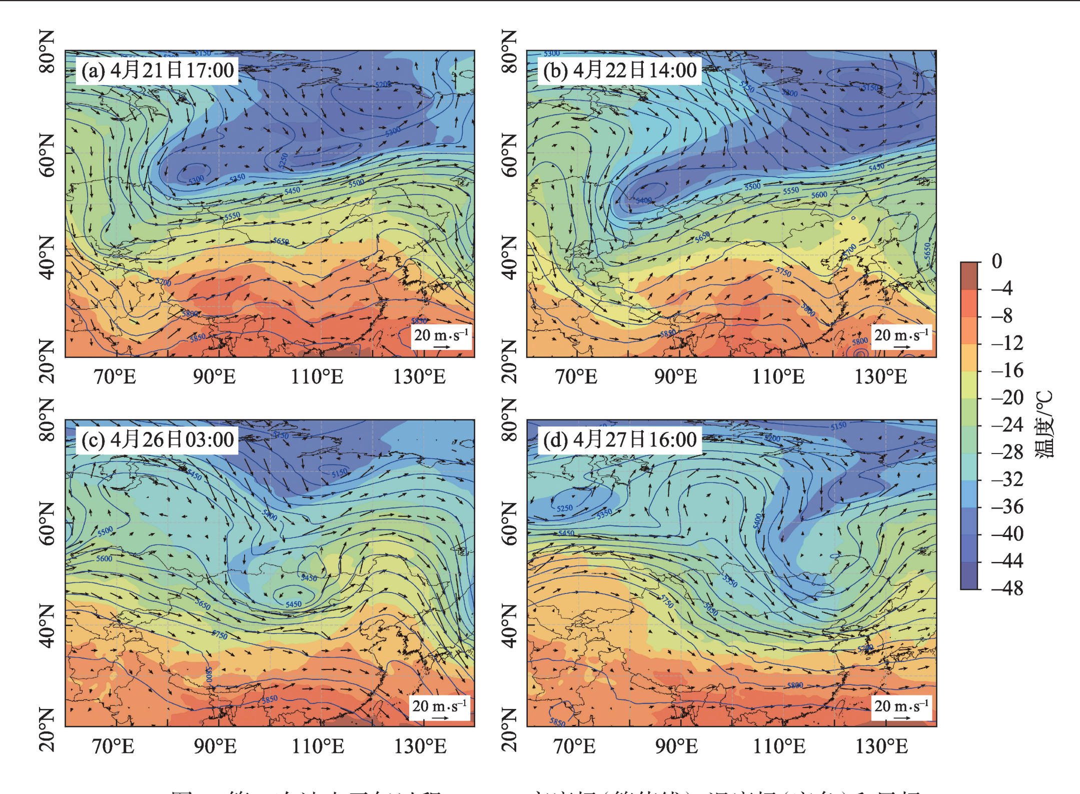


图7　第二次沙尘天气过程500 hPa高度场(等值线)、温度场(底色)和风场

Fig. 7　The 500 hPa height field (isoline), temperature field (background color) and wind field of the second dust weather process

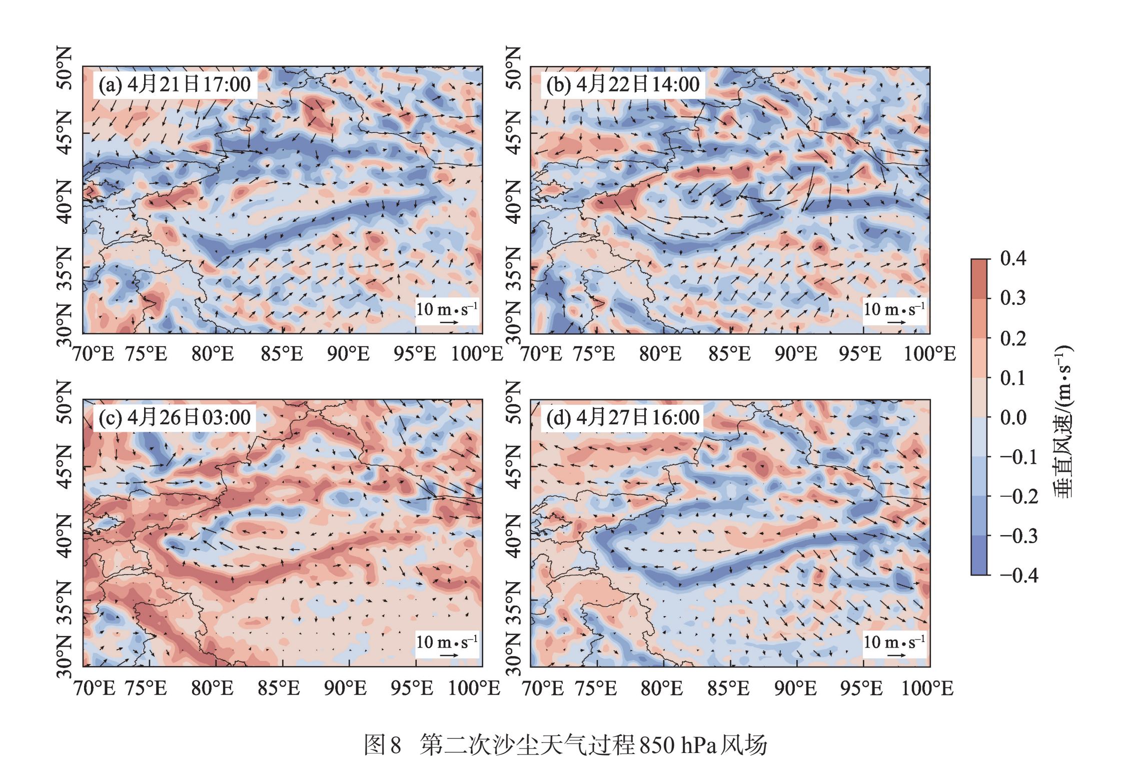
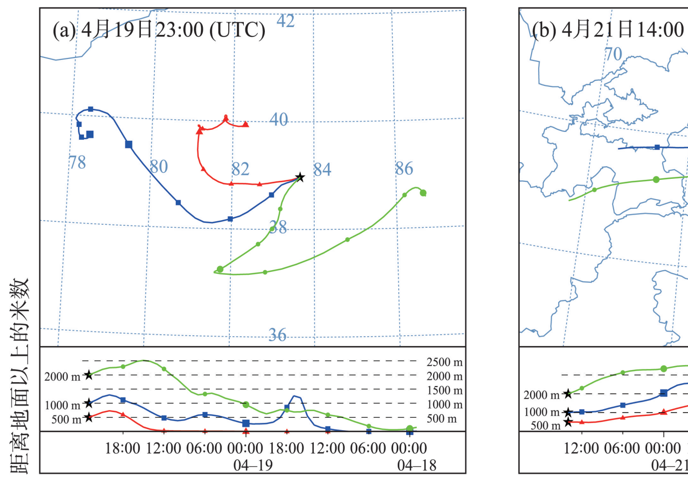


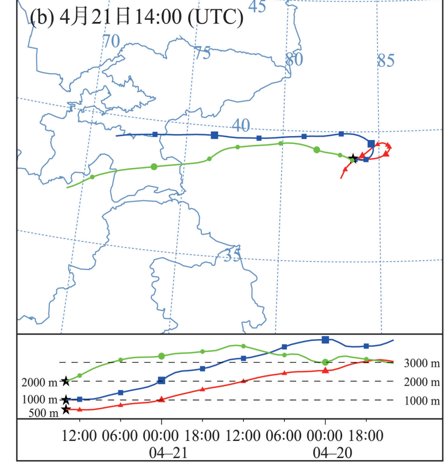
图8　第二次沙尘天气过程850 hPa风场

Fig. 8　The 850 hPa wind field of the second dust weather process

西部,东移过程中逐渐下沉;而500 m高度的气团源于塔中附近1.5 km高度,且移动速度缓慢。

第二次沙尘天气期间(图10a),500 m气团于23日02:00位于盆地东北部,一路携带近地面沙尘并经过库尔勒到达塔中,1 km气团环绕塔中周边移动,2 km气团来自盆地西部的喀什附近。由第二次沙尘天气结束的前1 d气团后向轨迹(图10b)可知,500 m和1 km气团均源于盆地北部,而2 km气团来

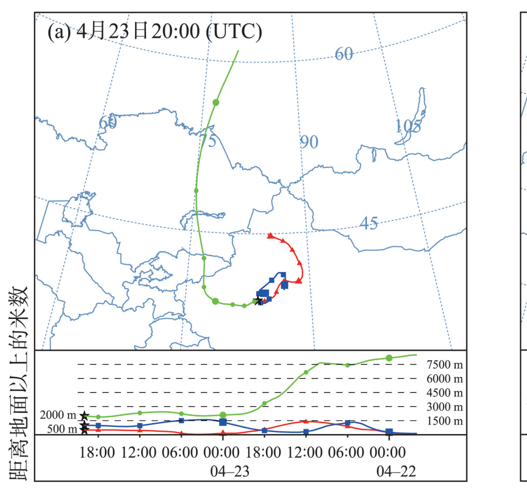




注：图a表示4月19日23:00(UTC)48 h后向轨迹。下同。

图9 HYSPLIT模拟的第一次沙尘天气期间塔中气团后向轨迹

Fig. 9 Backward trajectory of air mass in Tazhong during the first dust weather simulated by HYSPLIT



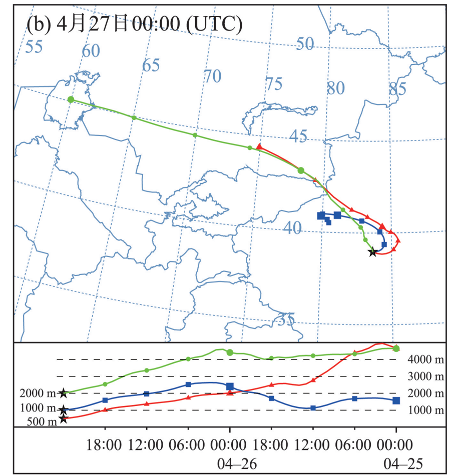


图10 HYSPLIT模拟的第二次沙尘天气期间塔中气团后向轨迹

Fig. 10 Backward trajectory of air mass in Tazhong during the second dust weather simulated by HYSPLIT

自哈萨克斯坦和阿富汗，迅速移动至阿克苏后抵达塔中。

2.3.2 盆地大范围沙尘天气变化 为全面了解盆地大范围沙尘天气变化情况及污染传输过程，以沙漠腹地周边4个绿洲城市的PM_{10}浓度和沙尘天气类型数据为例进一步分析，如图11所示。四个站点都陆续观测到了沙尘天气，和田、库尔勒、阿克苏和喀什的PM_{10}浓度分别于4月22日、25日、26日和27日达到峰值，其中和田于22日03:00达到3763 $\mu g \cdot m^{-3}$。由图10a可知，气团自西向东于4月22日中午抵达库尔勒，此时PM_{10}浓度达到1100 $\mu g \cdot m^{-3}$（图11b）；25日库尔勒观测到扬沙天气，PM_{10}浓度于17:00突增至2133 $\mu g \cdot m^{-3}$，随后36 h内平均浓度达899 $\mu g \cdot m^{-3}$，说明盆地东北部为第二次沙尘天气的主要沙源地之一，库尔勒、塔中陆续受到沙尘污染影响。19—23日，阿克苏受到持续扬沙天气影响，由图9a和图9b可知，500 m和1 km的气团基本来自塔中西北方向，可推断第一次沙尘天气的源区极可能位于盆地西北部；26日13:00—16:00阿克苏PM_{10}浓度超过1000 $\mu g \cdot m^{-3}$，浮尘天气持续至29日，根据图10b后向轨迹可知，阿克苏和塔中可能同时受到盆地西北部沙尘和邻国外源污染传输共同影响。喀什19—23日陆续出现扬沙、浮尘和沙尘暴天气，图9b和图10a的2 km轨迹来自喀什附近，尽管模拟气团运行高度较高，但不排除塔中在相应时段内受到盆地西部沙尘影响的可能性。

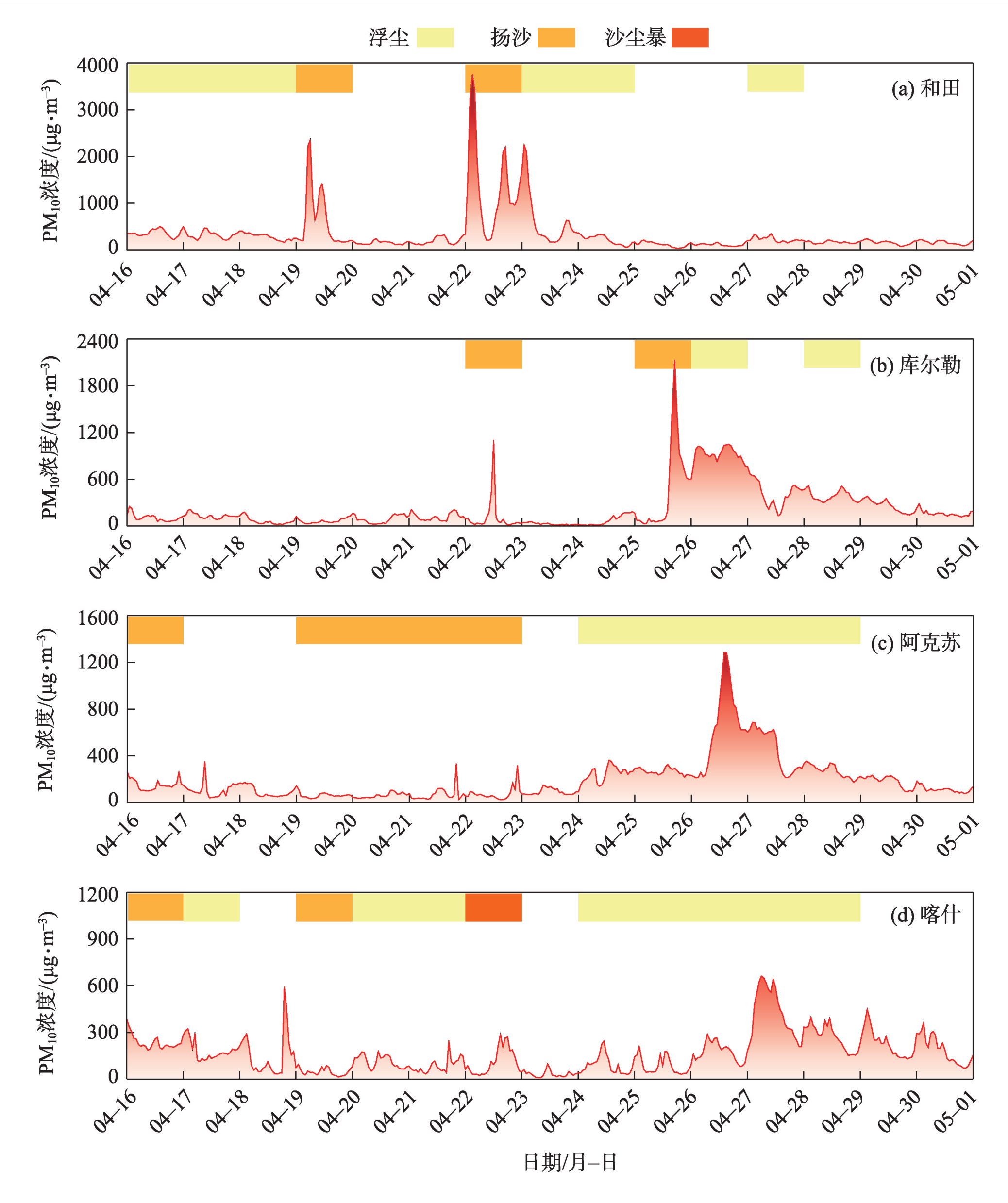


图11　塔里木盆地4个典型地区的PM_{10}浓度和沙尘天气变化

Fig. 11　Variation of PM_{10} concentration and dust weather of four typical areas in Tarim Basin

两次强沙尘天气期间HYSPLIT模拟的气团传输轨迹和盆地内典型地区的PM_{10}浓度以及沙尘天气变化相结合,可较好地反应2021年4月下旬塔里木盆地内大范围沙尘天气的动态过程。总体来看,第二次沙尘天气过程的污染传输高度更高、持续时间更长且影响范围更广。18日夜间及19日凌晨,冷空气翻越天山山脉,盆地西部起沙导致喀什与和田的PM_{10}浓度陆续突增,阿克苏出现持续扬沙天气,在偏西气流的影响下,当日20:00塔中第一次沙尘天气过境。随着盆地东北部的冷空气入侵,库尔勒、阿克苏PM_{10}的浓度分别于25日、26日突增并在一段时间内保持较高值,两地位于第二次沙尘天气沙源地东北部和北部附近,在本地起沙和外源传输的共同影响下,25日晚间塔中退偏比显著升高(图2),第二次沙尘天气持续至26日下午。26日起至月底,库尔勒、阿克苏和喀什的PM_{10}浓度显著高于16–26日,说明三地可能受到沙漠腹地沙尘传输影响。

3　结 论

本文利用激光雷达数据结合地面观测资料、ERA5再分析资料和HYSPLIT轨迹模型对塔中2021年春季两次沙尘天气的发生发展过程及传输路径

进行了分析研究,得出以下结论:

(1)塔克拉玛干沙漠腹地在2021年4月19日20:00—21日14:00和22日14:00—26日18:00出现了两次强沙尘天气过程,激光雷达反演的消光系数和退偏比随沙尘污染的产生、积累和消散先增大后减小。沙尘存在明显分层现象,集中分布在0~5 km。沙尘天气期间,0~2 km的消光系数>0.3 km^{-1};退偏比>0.6,远高于沙尘气溶胶的判定阈值0.31。

(2)两次沙尘天气均受高空低槽和地面冷空气共同影响,第一次沙尘天气主要由翻越天山的冷空气导致,盆地风速增大,有利于地表沙尘扬起。第二次沙尘天气主要来源于盆地东北部的冷空气入侵,且盆地多处为上升气流,推动地面起沙的同时也使部分站点的浮尘天气维持至28日。

(3)沙漠腹地第一次沙尘过程的污染源主要来自盆地西北部,沙尘在传输过程中逐渐扩散升空,同时可能受到盆地西部及西南部的沙尘污染影响;第二次沙尘天气的沙尘源于本地起沙和盆地东北部及北部。第二次沙尘天气的污染传输高度更高、持续时间更长且影响范围更广。

(4)和田、库尔勒、阿克苏和喀什等绿洲城市出现多次浮尘、扬沙和沙尘暴天气,和田PM_{10}浓度于22日达到峰值3763 $\mu g \cdot m^{-3}$。19日盆地西部起沙导致喀什、和田和阿克苏均出现扬沙天气,在偏西气流影响下,当日20:00塔中第一次沙尘天气过境。库尔勒和阿克苏绿洲距离第二次沙尘天气沙源地较近,两地PM_{10}浓度于25-26日突增并在一段时间内保持较高值。

参考文献(References):

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] 吴会娟, 鹿化煜, 王菁菁, 等. 全球沙漠面积和粉尘排放量的新估算[J]. 科学通报, 2022, 67(9): 860-871. [Wu Huijuan, Lu Huayu, Wang Jingjing, et al. A new estimate of global desert area and quantity of dust emission[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(9): 860-871.]

[3] Kok J F, Storelvmo T, Karydis V A, et al. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(2): 71-86.

[4] Yu H, Chin M, Yuan T, et al. The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(6): 1984-1991.

[5] Nie W, Wang T, Xue L K, et al. Asian dust storm observed at a rural mountain site in southern China: Chemical evolution and heterogeneous photochemistry[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(24): 11985-11995.

[6] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. Berlin: Springer, 1941.

[7] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1988, 93(D11): 14233-14242.

[8] Alfaro S C, Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D16): 18075-18084.

[9] Shao Y. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D10): 22437-22443.

[10] Kok J F, Parteli E J R, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust[J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(10): 106901.

[11] Wei G, Zhang C, Li Q, et al. Grain-size composition of the surface sediments in Chinese deserts and the associated dust emission[J]. CATENA, 2022, 219: 106615.

[12] 韩永翔, 杨胜利, 方小敏, 等. 塔里木盆地中的大气环流及昆仑山北坡的黄土堆积[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 351-355. [Han Yongxiang, Yang Shengli, Fang Xiaomin, et al. Atmospheric circulation in Tarim Basin and loess accumulation in northern slope of Kunlun Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(3): 351-355.]

[13] 刘新春, 钟玉婷, 王敏仲, 等. 塔里木盆地大气降尘变化特征及影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 954-960. [Liu Xinchun, Zhong Yuting, Wang Minzhong, et al. Atmospheric dustfall variation and factor analysis in Tarim Basin[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 954-960.]

[14] 程红霞, 林粤江, 陈鹏, 等. 塔里木盆地沙尘天气日数变化及影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(11): 1707-1717. [Cheng Hongxia, Lin Yuejiang, Chen Peng, et al. Spatial characteristics of sand-dust weather days and influencing factors in the Tarim Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(11): 1707-1717.]

[15] 孟露, 赵天良, 何清, 等. 近30年塔里木盆地浮尘天气及持续浮尘滞空的气候特征[J]. 气象学报, 2022, 80(2): 322-333. [Meng Lu, Zhao Tianliang, He Qing, et al. Climatic characteristics of floating dust and persistent floating dust over the Tarim Basin in the recent 30 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022, 80(2): 322-333.]

[16] 陈思宇, 黄建平, 李景鑫, 等. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙尘起沙,

传输和沉降的对比研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(8): 939-957. [Chen Siyu, Huang Jianping, Li Jingxin, et al. Comparison of dust emissions, transport, and deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(8): 939-957.]

[17] Uno I, Eguchi K, Yumimoto K, et al. Asian dust transported one full circuit around the globe[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(8): 557-560.

[18] 王慧琴. 塔里木盆地大气降尘时空变化及TSP理化特性分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012. [Wang Huiqin. Analysis on the Spatio-temporal Variations of Dust-fall and the Physical-chemical Properties of TSP in Tarim Basin[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2012.]

[19] Xia X, Zong X. Shortwave versus longwave direct radiative forcing by Taklimakan dust aerosols[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(7): L07803.

[20] Lau W K M, Kim M K, Kim K M, et al. Enhanced surface warming and accelerated snow melt in the Himalayas and Tibetan Plateau induced by absorbing aerosols[J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(2): 025204.

[21] 吴硕秋, 马晓燕. 利用风云四、MODIS及CALIPSO卫星资料分析西北沙尘过程的垂直和水平分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(8): 2892-2901. [Wu Shuoqiu, Ma Xiaoyan. Analysis of dust vertical and horizontal distribution during dust events in northwest China based on FY-4A, MODIS and CALIPSO satellite data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(8): 2892-2901.]

[22] 阴璐璐, 何清, 李京龙, 等. 基于地基雷达探究和田市一次沙尘污染过程[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6290-6300. [Yin Lulu, He Qing, Li Jinglong, et al. Observation and study of a sand and dust pollution process in Hotan City based on ground-based lidar[J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6290-6300.]

[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 沙尘天气等级(GB/T 20480-2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of Sand and Dust Weather(GB/T20480-2017)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[24] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.

[25] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12): 2059-2077.

[26] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.

[27] 贾瑞, 李君, 祝清哲, 等. 中国西北地区气溶胶的三维分布特征及其成因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 34-43. [Jia Rui, Li Jun, Zhu Qingzhe, et al. Three-dimensional distribution and formation causes of aerosols over Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 34-43.]

[28] 廖家艳, 周天, 韩璧森, 等. 我国西北半干旱区气溶胶类型的地基激光雷达判别[J]. 干旱气象, 2023, 41(4): 570-578. [Liao Jiayan, Zhou Tian, Han Bisen, et al. Aerosol types discrimination in semi-arid region of Northwest China using ground-based lidar data [J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4): 570-578.]

[29] 李晶晶, 何清, 阴璐璐, 等. 基于激光雷达的新疆民丰地区一次沙尘污染过程研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(9): 93-102. [Li Jingjing, He Qing, Yin Lulu et al. Lidar-based study of a sand and dust pollution process in Minfeng area, Xinjiang, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(9): 93-102.]

[30] Ge J M, Huang J P, Xu C P, et al. Characteristics of Taklimakan dust emission and distribution: A satellite and reanalysis field perspective[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(20): 11-772.

[31] Hu Q, Wang H, Goloub P, et al. The characterization of Taklamakan dust properties using a multiwavelength Raman polarization lidar in Kashi, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(22): 13817-13834.

Study on the vertical distribution and transport of dust aerosols during typical dust weather events in the Tarim Basin, Northwest China in spring, 2021

TIAN Wenjun[1,2], XUE Yibo[1,2], ZHANG Xiaoxiao[1], LEI Jiaqiang[1], LI Shengyu[1], FAN Jinglong[1,3], ZHANG Heng[1,3]

(1. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Taklimakan Desert Ecosystem Field Observation and Research Station of Xinjiang, Qiemo 841900, Xinjiang, China)

Abstract: Based on lidar observations combined with ERA5 reanalysis data, HYSPLIT trajectory model, environmental monitoring data and meteorological observations, we studied the vertical distribution of optical properties of dust aerosols in the Taklamakan hinterland in spring 2021. The formation, development processes, potential sources and transport pathways of large-scale aeolian dust weather in Tarim Basin were analyzed and discussed. The results showed that two strong dust processes occurred in the desert hinterland from 20:00 on April 19 to 14:00 on April 21 and from 14:00 on April 22 to 18:00 on April 26. Large amount of suspended dust particles were detected at the height of 0−5 km over the atmosphere . The extinction coefficient was above 0.3 km^{-1}, within 2 km of the surface, and the depolarization ratio was more than 0.6, which was much higher than the threshold value of 0.31. These two dust events were both affected by the low trough in the upper air and the ground cold air. The first dust weather event was mainly caused by cold air crossing over the Tianshan Mountains. Blowing dust weather occurred in Kashgar, Hotan and Aksu. The PM_{10} concentration in Hotan reached a peak of 3763 $\mu g \cdot m^{-3}$on April 22. And the dust source was from the western of the basin. The second dust weather event primarily resulted from cold air entering the basin from the northeast. The PM_{10} concentration in Korla and Aksu cities increased sharply to 1200 $\mu g \cdot m^{-3}$ from 25 to 26, April. Dust particles originated from the local sand, northeastern and northern of the basin. During the second dust weather process, dust particles were blown up and transported higher than before, and the air pollution lasts longer and is more widespread. The windblown dust can suspend above 4 km height during dust processes. The particles transport height was significantly higher than high-frequency areas of dust weather in Hotan and Minfeng.

Keywords: Tarim Basin; dust weather; aerosol; vertical distribution; lidar; Tazhong; PM_{10}